

文章编号:1000-582X(2002)12-0137-04

# 缙云公路隧道围岩位移分析

唐建新<sup>1</sup>, 蔡世明<sup>1</sup>, 刘洪洲<sup>1,2</sup>, 代高飞<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 资源与环境科学学院, 重庆 400044; 2. 同济大学 岩土工程研究所, 上海 200092)

**摘要:**以缙云公路隧道为例,通过对缙云公路隧道现场实测的围岩位移资料分析,综合考虑公路隧道所处地质环境及施工工艺水平等因素,讨论了公路隧道施工中围岩位移和区域性地质构造、围岩类别、应力水平之间的关系,分析了水平收敛和拱顶沉降及不同方向的测线位移与围岩稳定基准之间的关系,提出了位移敏感率的概念,以便合理规范地评判公路隧道围岩位移的稳定性,得出了沿隧道纵向的围岩位移分布与其区域性地质构造和水平应力相适应的结论。其结果对于复杂地质环境中公路隧道的设计、施工和研究工作具有借鉴意义。

**关键词:**公路隧道; 围岩位移; 位移敏感率

**中图分类号:**U455

**文献标识码:**A

## 1 地质概况

缙云公路隧道的隧址区地层主要为被数条后期断层、断裂错断的一个背斜构造,中间多级次生构造主要集中于背斜西翼,且轴部地表因次级向斜而形成一带状岩溶槽谷。背斜东翼有一倾角 $70^\circ$ 的逆断层 $F_1$ ,西翼则有两条倾角较缓的断层 $F_4$ 、 $F_7$ 。背斜受自东向西主动推力的影响,致使槽谷特别是深部地层承受较大挤压而变得破碎,并沿西侧 $F_4$ 、 $F_7$ 断层面滑移,开挖后围岩应力释放较大,致使位移偏大。岩性主要为 $T_3xj^1$ 、 $T_2l$ 地层,自身强度偏低,加之挤压揉皱严重,破坏较剧,更有石膏夹层、地表槽谷渗水,无疑更加剧了围岩变形不稳定。隧道最大埋深为300 m左右<sup>[1-2]</sup>。

## 2 围岩位移与区域构造特点

由于隧道工程所处的地质环境具有很强的非确定性和模糊性,因此对地质环境的考察离不开区域大环境和局域小环境。后者指围绕隧址区的有限的工程影响范围,而前者为此区之外的广大地层,也是产生隧址区域性应力场的主要载体。由于长大隧道往往沿轴向延伸数公里以上,穿越断裂、断层等大型地质构造以及溶洞、采煤区等不良地质条件是不可避免的,因此就任一座隧道而言,沿纵向分布的围岩位移必然能够体现其构造特点,而单个测点仅仅反映局部岩体结构的位移特点。以成渝高速公路缙云隧道为例,除断层及破碎带等地质构造严重影响区隧道拱顶和两帮发生大量

的内位移(收敛)外,左右两洞呈现较好的围岩位移对应关系,即

- 1) 相对于洞身而言,洞口附近的围岩位移(包括拱顶下沉和水平收敛)普遍较小;
- 2) 拱顶下沉量大的隧道区段,隧道净空出现的负向水平位移值(水平扩张)亦越大;
- 3) 净空位移、拱顶下沉与埋藏深度之间不存在很明确的比例对应关系;
- 4) 施工期间单条测线的位移-时间曲线可以用基本函数(如对数型、指数型或双曲线型)或其组合函数较好地拟合。

从隧道纵向来看,左、右隧道中部位置的位移普遍偏小,仅为10 mm以下,隧道断面呈拱顶下沉、侧墙向内收敛的变形特点。而距西、东洞口分别为800~1 200 m、400~800 m的区段位移量达30~40 mm以上,相差3~10倍左右,此段呈现净空收敛、拱顶下沉的特点。从纵向围岩位移来看,出现了双洞相互对应的“双驼峰(或叠M形)”特点,也就是说最大位移并未发生在埋深最大的中部,而在中部和两洞口之间。显然这种分布特点和整个隧址区的背斜构造特点相适应。

## 3 围岩位移与围岩类别

从一般性的角度而言,围岩位移随着围岩类别提高而呈减小的特点,但是具体到隧道工程的某个断面则不一定都成立(如本文第5部分的讨论)。它不仅和自身的地质环境有关还和周近的地层特性及施工工艺

• 收稿日期:2002-09-23

作者简介:唐建新(1959-),男,四川威远人,重庆大学副教授,博士研究生,主要从事采矿工程和地质灾害治理方面的研究和教学工作。

水平等因素相关<sup>[3-4]</sup>。这里所讲的位移不仅指围岩的最终稳定位移量,还涵盖了位移增量或位移速度。至于围岩类别指交通部《公路隧道勘测规程》和公路隧道施工技术规范》所列的分类标准,即岩体结构越完整,洞室稳定程度越好,类别就越高。纵观目前发表的众多文献,可以看出体现设计、施工、科研三结合的洞身围岩类别是地层结构构造、岩性、地下水、施工工艺和技术水准等诸多因素的综合反映。它不仅影响到业主和施工单位所关心的进度控制、质量保证,还对工程造价以及隧道的营运寿命有直接影响。合理可行的围岩类别应能较好地适应地层变化,并具有一定的应变性能和可操作性及衬砌型式过渡的连续性。不同的围岩类别直接对应于不同的衬砌结构型式,在保证隧道结构自身安全稳定的前提下,同时应能保证施工工艺及施工过程的连贯性,也就是说力求相邻段的围岩类别平缓过渡,无论从施工角度还是从结构受力角度,均有利。因此围岩分类不是简单的逐段划分,而是包含地质调查、施工技术及管理水平、整体结构受力、线路最优化的系统工程。目前已将灰色聚类分析、模糊综合评判、神经网络等技术用于划分合理的围岩类别研究上<sup>[5]</sup>。

#### 4 围岩位移和应力水平

围岩位移一方面和岩体类别有关,另一方面还具有

应力相对性。也就是说,围岩位移的绝对值或位移增量固然重要,应力水平更为重要。同一应力水平,对易变形的软弱岩体而言,发生大位移不一定意味着失稳,而对脆性岩体则不然。然而现场的应力条件不可能和实验室给定的那样准确,无论实测地应力还是位移反演出的地应力都带有一定的局限性和置信度,因而在目前情况下要找到现场监测位移与应力水平的直接联系是非常困难的。可行的方案是采用各种监测仪器定量地获得围岩应力、位移的动态变化<sup>[6]</sup>。潭峪沟隧道的监测成果反映了二者较一致的对应关系。成渝高速公路的中梁山隧道、缙云山隧道,广渝高速公路的华蓥山隧道,川藏公路的二郎山隧道等<sup>[7]</sup>亦有类似结论。

#### 5 水平位移和拱顶沉降

文献研究表明,隧道净空的水平位移与拱顶沉降并不存在绝对的大小关系,但受区域地应力场、岩性和岩-衬砌相对刚度等影响。二者在相互正交的方向表现出位移增长相似的特点。位移随时间的增长变化曲线形状极大地受施工工艺过程的影响,如开挖瞬间围岩位移往往突增,而在支护或开挖面停顿期间呈缓慢增长的流变特点,围岩和支护结构表现出较明显的位移蠕变、应力松弛和部分弹性后效,由此形成对应开挖-支护的台阶状位移增长曲线。现场实测的这一特点由实验室的相似模拟实验已得到较好模拟(见表1)。

表1 缙云隧道部分位移监测结果

监测断面	地层岩性	岩类	监测的最大位移/mm	围岩变形的稳定趋势
K328 + 956	T <sub>3</sub> xj <sup>1</sup> , 中厚层泥岩夹煤线	II类未变	水平最大位移 1.49 拱顶下沉最大 6.15	前 5 d 位移增量较大,水平位移在 25 d 后基本趋稳 前 5 d 位移增量较大,拱顶下沉在 15 d 后基本趋稳
K329 + 168	T <sub>2</sub> L, 角砾状灰岩, 泥灰岩, 混杂泥岩	IV类改 III类	水平最大位移 34.54 拱顶下沉最大 12.15	前 30 d 位移增量较大,90 d 后进入流变阶段 前 30 d 位移增量较大,80 d 后进入流变阶段
IIK328 + 990	T <sub>2</sub> L, 破碎泥岩夹灰岩角砾	III类未变	水平最大位移 37.25 拱顶下沉最大 15	前 30 d 位移增量较大,60 d 后进入流变阶段 前 15 d 位移增量较大,60 d 后进入流变阶段
K329 + 323	T <sub>1j</sub> , 灰黑色薄中厚层白云质灰岩	IV类未变	水平最大位移 6.21 拱顶下沉最大 4	前 8 d 位移增量较大,20 d 后进入流变阶段 前 12 d 位移增量较大,30 d 后进入流变阶段

从表1中可以看出,K329 + 168和IIK328 + 990两监测断面的最大水平位移和拱顶下沉很接近,位移-时间曲线也呈近似特点。从围岩位移特点来看,将两区段划为一类是合理的。K328 + 956断面所在II类围岩区段并未取得预期的大位移,反而和IV类围岩断面K329 + 323监测结果接近,其最大位移仅是后两个断面的几分到十分之一,这归因于临近该断面的管棚支护(K328 + 877)和该段开挖前的超前锚杆支护,似为合理。由施工角度来说,仅仅凭藉位移大小或位移速度来判定围岩类别是不恰当的,即围岩位移情况只能作为确定围岩类别的充分条件,而不能作为唯一的充要条件。

#### 6 位移敏感率概念的提出与讨论

为便于围岩位移监控和基准的界定与控制,目前针对净空收敛和拱顶沉降分别提出了各自不同的判定水准,在应用中往往存在不尽符合的现象,给应用带来诸多不便和不可避免的个人经验色彩,因而有必要进一步改进。施工监测的实验表明,水平收敛和拱顶下沉的变化速率相差悬殊,给出统一的判定标准是相当困难的。为此,笔者提出位移敏感率的概念来衡量净空位移测线之间的动态关系,以直观反映出最敏感的隧道位移变化的方向。以水平方向相对于垂直方向的位移敏感率为例,其定义为

$$S = \frac{|u_i - u_{i-1}|}{|v_i - v_{i-1}|} = \frac{|\Delta u|}{|\Delta v|} \quad (1)$$

式中  $S$  表示位移敏感率,分子和分母表示同一时间间隔内同一断面的水平、垂直测线在前后相邻两次量测时的位移差值(mm)或位移速率(mm/d)。显然这是一个相对性很强的概念。考虑到不同测线易出现位移方向相反,定义式中取增量的绝对值。

当  $S > 1$  时,水平位移速率大于拱顶下沉速率,此时宜以水平位移作为控制基准;

当  $S < 1$  时,水平位移速率小于拱顶下沉速率,此时宜以垂向位移作为控制基准。

一般情况下,很少出现  $S = 1$ 。这个概念也可以推广到任意方向。由于现场施测时,水平测点和拱顶测点一般同时埋设、同时测取、同时整理分析,所以此定义具有较强的实用性和可操作性(实例见表 2)。

表 2 位移敏感率实例

时间/(t/d)	墙中 $u$	起拱线 $u'$	拱顶 $v$	墙中 $\Delta u$	起拱线 $\Delta u'$	拱顶 $\Delta v$	$ \Delta u' / \Delta u $	$ \Delta v / \Delta u $
0.40	0.50	0.47	4.11	0.50	0.47	4.11	0.94	8.22
1.71	0.58	0.97	3.89	0.08	0.50	-0.22	6.25	2.75
2.46	0.71	1.31	3.94	0.13	0.34	0.05	2.62	0.38
3.50	1.34	1.49	4.02	0.63	0.18	0.08	0.29	0.13
4.42	1.49	2.04	4.29	0.15	0.55	0.27	3.67	1.80
5.50	1.57	2.17	4.59	0.08	0.13	0.30	1.63	3.75
6.71	1.79	2.31	4.97	0.22	0.14	0.38	0.64	1.73
7.63	2.19	2.07	5.05	0.40	-0.24	0.08	0.60	0.20
8.71	2.34	2.47	5.17	0.15	0.40	0.12	2.67	0.80
9.63	2.13	2.46	4.87	-0.21	-0.01	-0.30	0.05	1.43
10.42	2.04	2.49	4.35	-0.09	0.03	-0.52	0.33	5.78
11.75	2.30	2.61	4.47	0.26	0.12	0.12	0.46	0.46
12.50	2.09	2.68	4.52	-0.21	0.07	0.05	0.33	0.24
13.42	2.42	2.97	4.56	0.33	0.29	0.04	0.88	0.12
14.42	2.55	3.40	4.57	0.13	0.43	0.01	3.31	0.08
15.42	2.83	3.50	4.60	0.28	0.10	0.03	0.36	0.11
16.67	3.02	3.85	4.68	0.19	0.35	0.08	0.23	0.42
17.50	3.24	4.14	4.72	0.22	0.29	0.04	0.40	0.18
18.50	3.39	4.08	4.45	0.15	-0.06	-0.27	0.40	1.80
20.50	3.18	4.31	4.14	-0.21	0.23	-0.31	1.10	1.48
21.50	3.34	4.26	3.58	0.16	-0.05	-0.56	0.31	3.50
22.50	3.61	4.81	3.61	0.27	0.55	0.03	2.04	0.11
23.50	3.41	5.19	3.64	-0.20	0.38	0.03	2.04	0.11
24.50	3.76	5.33	3.66	0.35	0.14	0.02	0.40	0.06
27.75	4.67	5.74	3.75	0.91	0.41	0.09	0.45	0.10
29.75	4.57	6.06	3.68	-0.10	0.32	-0.07	3.20	0.70
31.75	4.66	6.17	3.62	0.09	0.11	-0.06	1.22	0.67
35.00	4.78	6.33	3.88	0.12	0.16	0.26	0.08	2.17
48.75	5.02	7.39	4.05	0.24	1.06	0.62	4.42	2.58

由图 1 可见,同一时刻,沿着隧道周边的围岩位移增量大小不等,其敏感率也是变化的。因此在围岩位移的不同发展阶段,宜采用不同方向的位移增量作为其稳定性的评判指标。



图 1 不同时刻位移敏感率变化的实测曲线

## 7 结 论

通过对缙云隧道现场实测的围岩位移资料的分

析,得到以下主要结论:

1)沿隧道纵向的围岩位移总体分布特点和区域性地质构造、应力水平相适应。

2)为便于合理而又规范地评判隧道围岩位移的稳定性,提出了位移敏感率的概念。

### 参考文献:

- [1] 刘洪洲. 新奥法建造隧道中围岩变形特点及其规律性研究[D]. 重庆:重庆大学,1993.
- [2] 刘洪洲. 大跨度扁坦公路隧道施工力学响应及施工方法研究[D]. 重庆:重庆大学,1999.
- [3] 陈湘君. 软弱膨胀性围岩隧道的设计与施工[J]. 铁道标准设计,1999(5):23-24.
- [4] 李合领,李素红. 不良地质隧道变形观测分析方法[J]. 山西建筑,2001,27(3):153-154.
- [5] 王文,任光明,左三胜,等. 深埋长大隧道围岩分类评价的探讨与应用[J]. 地质灾害与环境保护,1997,8(4):14-21.

[6] 张金峰,高崇林,齐占国.隧道围岩量测工法[J].东北公路,1997(4):83-87.

[7] 李俊法.歌乐山隧道主要施工技术问题的探讨[J].西部探矿工程,2001(4):84-85.

## Analyses of Rockmass Displacement of Jinyun Tunnel

TANG Jian-xin<sup>1</sup>, CAO Shi-ming<sup>1</sup>, LIU Hong-zhou<sup>1,2</sup>, DAI Gao-fei<sup>1</sup>

(1. College of Resource and Environment Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** As an example, through analyses of in-situ measurements of Jinyun Road Tunnel and considering the geological environment and construction technics synthetically, relation among rockmass displacement and geological tectonics, rockmass sort, horizontal displacement and vertical subsidence, a new concept "sensitivity of displacement" are presented in order to evaluate stability of displacement normally. The characteristic of distribution of rockmass displacement along the longitudinal direction of road tunnel related to geological tectonics is concluded. It can be used for reference of design, construction and research of road tunnel.

**Key words:** Road tunnel; Rockmass displacement; Sensitivity of displacement

(责任编辑 姚 飞)

(上接第 136 页)

## Analytical and Calculative Method of Stability of MingShan Landslide in the Three Gorges Reservoir Area

CHEN Ping<sup>1</sup>, XU Jiang<sup>1</sup>, LIU Yu-hong<sup>2</sup>, LI Ke-gang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. 208 Hydrogeology & Engineering geology Crew of Geological Prospecting Primary Company, Chongqing 400015, China)

**Abstract:** After the dam of the Three Gorges is built, the raising water will inevitably cause the revival of the part of ancient landslide and the generation of new landslide, which will influence the town development and traffic safety in the Three Gorges Reservoir Area. In the light of the specific conditions of the Three Gorges Reservoir Area, this paper, taking Fengdu's MingShan landslide in Chongqing for an example, has considered ten typical calculative projects, offered the correspondent load systems acting on the sliding mass and put forward the analytical and calculative method to evaluate the stability of a landslide. The ten typical calculative projects include dry season (natural state), raining season (rainstorm or rain for a long period of time), dry season and water level (175 m) of the reservoir, raining season and water level (175 m) of the reservoir, dry season and earthquake, raining season and earthquake, dry season and water level (175 m) of the reservoir and earthquake, raining season and water level (175 m) of the reservoir and earthquake, dry season and water level lowered from 175 m to 145 m, raining seasons and water level lowered from 175 m to 145 m, and so on.

**Key words:** landslide; stability; the Three Gorges Reservoir Area

(责任编辑 姚 飞)